

Doprinos dubokog hlađenja poboljšanju svojstava visokolegiranih alatnih čelika za hladni rad

Slačanin, Ivan

Undergraduate thesis / Završni rad

2016

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:051209>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-14**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Ivan Slaćanin

Zagreb, 2016.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof.dr.sc. Franjo Cajner

Student:

Ivan Slaćanin

Zagreb, 2016.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru prof.dr.sc. Franji Cajneru na mentorstvu i pomoći pri izradi ovog rada.

Zahvaljujem se prof. Darku Landeku na pomoći pri radu u laboratoriju, te na brojnim korisnim savjetima vezanim uz izradu rada.

Zahvaljujem se i svojoj obitelji na podršci iskazanoj tijekom studija.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje
Datum: 19-09-2016og
Klasa: 602-04/16-6/3
Urbroj: 15-1703-16-329

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: Ivan Slučanin Mat. br.: 0035187850

Naslov rada na hrvatskom jeziku: Doprinos dubokog hlađenja poboljšanja svojstava visokolegiranih alatnih čelika za hladni rad

Naslov rada na engleskom jeziku: Contribution of deep cryogenic treatment on the properties of high alloyed cold work tool steels

Opis zadatka:

U teorijskom dijelu rada treba analizirati dosadašnje spoznaje o doprinosu dubokog hlađenja na svojstva visokolegiranih alatnih čelika za hladni rad.

U eksperimentalnom dijelu rada planirati i provesti pokuse abrazijskog i erozijskog trošenja na izabranom predstavniku ove skupine alatnih čelika te analizirati doprinos dubokog hlađenja na postignuta svojstva.

Zadatak zadan:

25. studenog 2015.

Zadatak zadan:

Prof. dr. sc. Franjo Čajner

Rok predaje rada:

1. rok: 25. veljače 2016.
2. rok (izvanredni): 20. lipnja 2016.
3. rok: 17. rujna 2016.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 29.2., 02. i 03.03. 2016.
2. rok (izvanredni): 30. 06. 2016.
3. rok: 19., 20. i 21. 09. 2016.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Zoran Kunica

SADRŽAJ

POPIS SLIKA	i
POPIS TABLICA	ii
POPIS OZNAKA	ii
SAŽETAK	iii
1. TEORIJSKI DIO	1
1.1. UVOD	1
1.2 Visokolegirani alatni čelici za hladni rad	2
1.3 Proces toplinske obrade	5
1.3.1 Kaljenje	6
1.3.2 Duboko hlađenje	6
1.3.3 Popuštanje	7
1.4 Utjecaj dubokog hlađenja na svojstva visokolegiranih alatnih čelika za hladni rad	9
1.4.1 Mikrostruktura	9
1.4.2 Toplinska vodljivost	11
1.4.3 Utjecaj na mehanička svojstva	12
1.5 Otpornost na trošenje	15
2. EKSPERIMENTALNI DIO	17
2.1. Cilj istraživanja	17
2.2 Plan pokusa	17
2.3 Ispitivani materijal i priprema	18
2.4 Toplinska obrada uzoraka	19
2.5 Ispitivanje otpornosti na erozijsko trošenje	20
2.5.1 Opis postupka ispitivanja otpornosti na abrazivnu eroziju	22
2.5.2 Rezultati ispitivanja	25
2.5.3 Analiza rezultata ispitivanja otpornosti na erozijsko trošenje	29
2.5.4 Usporedba sa rezultatima iz prethodnih radova	30
2.6 Ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje	32
2.6.1 Opis postupka	32
2.6.2 Rezultati mjerenja otpornosti na abrazijsko trošenje	33
2.6.3 Analiza rezultata	37
3. ZAKLJUČAK	38
4. LITERATURA	39

POPIS SLIKA

Slika 1. Tvrdoće pojedinih vrsta karbida[3]	3
Slika 2. Udio zaostalog austenita u visokolegiranom alatnom čeliku X155CrNiVMo 12-1 ovisno o temperaturi austenitizacije [2]	4
Slika 3. Uptonov dijagram[4]	5
Slika 4. Poželjan slijed toplinske obrade za čelike koji se podvrgavaju dubokom hlađenju [5]	5
Slika 5. Dijagram toplinske obrade za visokolegirane alatne čelike za hladni rad koji se podvrgavaju dubokom hlađenju [7]	8
Slika 6. Mikrostruktura konvencionalno obrađenog alatnog čelika (kaljenje+popuštanje) [8]	10
Slika 7. Mikrostruktura čelika koji je podvrgnut poželjnom režimu obrade(kaljenje+duboko hlađenje+popuštanje) [8]	10
Slika 8. Utjecaj brzine gašenja i vremena držanja na temperaturi hlađenja na tvrdoću alatnog čelika X155CrNiVMo 12-1 [3]	12
Slika 9. Utjecaj temperature austenitizacije i trajanja procesa dubokog hlađenja na tvrdoću alatnog čelika X155CrNiVMo 12-1 [10]	13
Slika 10. Utjecaj temperatura hlađenja i austenitizacije na udarni rad loma alatnog čelika za hladni rad [10]	14
Slika 11. Međuovisnost tvrdoće, brzine trošenja i režima ohlađivanja alatnog čelika[10]	16
Slika 12. Skica izrade uzoraka za erozijsko ispitivanje [11]	18
Slika 13. Uzorci za abrazijsko ispitivanje	19
Slika 14. Dijagram toplinske obrade uzoraka za abrazijsko i erozijsko ispitivanje	20
Slika 15. Uređaj za ispitivanje otpornosti na eroziju[11]	23
Slika 16. Detalj A (slika 2.4) sa shematskim prikazom osovine, sapnice, nosača i putanje uređaja za ispitivanje trošenja erozijom [11]	24
Slika 17. Oznaka i karakteristike pijeska korištenog u ispitivanju erozijskog trošenja	24
Slika 18. Prosječni ukupni gubici mase u erozijskom ispitivanju za svaku skupinu uzoraka od čelika X155CrNiVMo 12-1	27
Slika 19. Prosječne izmjerene tvrdoće uzoraka od čelika X155CrNiVMo12-1 za erozijsko ispitivanje[12]	28
Slika 20. Usporedba rezultata prethodnih i vlastitih ispitivanja erozijskog trošenja u trajanju od 15 minuta za skupine uzoraka od čelika X155CrNiVMo 12-1 sa temperaturom austenitizacije $\vartheta_a = 1020\text{ }^\circ\text{C}$	30
Slika 21. Usporedba rezultata prethodnih i vlastitih ispitivanja erozijskog trošenja u trajanju od 15 minuta za skupine uzoraka od čelika X155CrNiVMo 12-1 sa temperaturom austenitizacije $\vartheta_a = 1080\text{ }^\circ\text{C}$	31
Slika 22. Skica uređaja "suhi pijesak/gumeni kotač"[11]	32
Slika 23. Rezultati abrazijskog ispitivanja za skupine uzoraka sa $\vartheta_a = 1020\text{ }^\circ\text{C}$	35
Slika 24. Rezultati abrazijskog ispitivanja za skupine uzoraka sa $\vartheta_a = 1080\text{ }^\circ\text{C}$	35
Slika 25. Prosječni ukupni gubici masa (nakon 3000 okretaja) za svaku skupinu uzoraka nakon provedenog abrazijskog ispitivanja	36
Slika 26. Izmjerene tvrdoće uzoraka za abrazijsko ispitivanje[13]	36

POPIS TABLICA

Tablica 1. Oznake skupina uzoraka	17
Tablica 2. Kemijski sastav ispitivanog čelika X155CrNiVMo12-1	18
Tablica 3. Redosljed izvođenja ispitivanja otpornosti na erozijsko trošenje	21
Tablica 4. Rezultati erozijskog ispitivanja.....	26
Tabela 5. Rezultati abrazijskog ispitivanja.....	34

POPIS OZNAKA

Oznaka ili kratica	Jedinica	Opis
Az		Zaostali austenit
dm	g	Ukupni gubitak mase
F	N	Sila
HRC		Tvrdoća po Rockwellu
m	g	Masa
m0	g	Početna masa uzorka
m15	g	Masa uzorka nakon 15 minuta ispitivanja
m30	g	Masa uzorka nakon 30 minuta ispitivanja
m45	g	Masa uzorka nakon 45 minuta ispitivanja
m500	g	Masa uzorka nakon 500 okretaja
m1000	g	Masa uzorka nakon 1000 okretaja
m2000	g	Masa uzorka nakon 2000 okretaja
m3000	g	Masa uzorka nakon 3000 okretaja
Mf	°C	Temperatura završetka stvaranja martenzita pri gašenju
Ms	°C	Temperatura početka stvaranja martenzita pri gašenju
n		Broj okretaja
t	s	Vrijeme
θa	°C	Temperatura austenitizacije
θp	°C	Temperatura popuštanja

SAŽETAK

Ovaj rad bavi se utjecajem dubokog hlađenja na svojstva visokolegiranih alatnih čelika za hladni rad. Zbog visokog udjela zaostalog austenita nakon provedenog gašenja s temperature austenitizacije duboko hlađenje se sve više počinje primjenjivati u toplinskoj obradi visokolegiranih alatnih čelika za hladni rad da bi uklonilo nepoželjni zaostali austenit u mikrostrukturi visokolegiranog alatnog čelika za hladni rad te pokrenulu precipitaciju finih karbida za koje se vjeruje da povisuju žilavost i otpornost na trošenje.

Na izabranom predstavniku te skupine materijala, čeliku čelik X155CrVMo 12-1(AISI D2) provedena su opsežna tribološka ispitivanja.

Na uzorcima od izabranog čelika provedeno je 8 različitih ciklusa toplinskih obrada, uzorci su potom tribološki ispitani na otpornost prema abraziji i eroziji sa ciljem pronalaska povezanosti različitih ciklusa toplinske obrade i stanja materijala sa otpornosti na trošenje.

1. TEORIJSKI DIO

1.1. UVOD

Alatni čelici služe za izradu alata kojim se obrađuju i oblikuju metalni ili nemetalni materijali. Alat je osnovno pomagalo u ručnoj ili strojnoj obradi materijala čiji je krajnji rezultat uporabni proizvod. Alati danas imaju vrlo široku primjenu u svim granama industrijske proizvodnje. Jedna od osnovnih podjela alata jest prema primjeni i to na: rezne alate, stezne alate, mjerne alate, ručne alate, alate za oblikovanje deformiranjem, alati za lijevanje i alate za preradu polimera.

Alatni čelik mora zadovoljiti niz zahtjeva koji se dijele na primarne i sekundarne zahtjeve i svojstva. Primarnim zahtjevima se smatraju otpornost na trošenje i žilavost dok se sekundarnim zahtjevima smatraju npr. otpornost na popuštanje (neki radovi smještaju ovo svojstvo u primarnu skupinu ali pošto se ovaj radi bavi alatnim čelikom za hladni rad za tu vrstu čelika nije predviđen rad na povišenim temperaturama), rezljivost, što veća zakaljivost, prokaljivost, otpornost na koroziju, sigurnost protiv pojave pukotina itd. [1].

Da bi se zadovoljili traženi zahtjevi alatni čelici se primjenjuju u toplinski obrađenom stanju primarno zakaljeni i popušteni, no dodatno ili alternativno se podvrgavaju raznim postupcima modificiranja mikrostrukture ili nanošenja novih slojeva poput površinskog kaljenja, raznih termokemijskih postupaka, postupaka nanošenja karbida, postupka tvrdog elektrokemijskog kromiranja te postupcima nanošenja dijamančnih slojeva.

Duboko hlađenje je postupak toplinske obrade alata koji se sve više istražuje kao još jedan mogući dodatak za postizanje boljih mehaničkih i triboloških svojstava alata te će ovaj rad istražiti njegov utjecaj na abrazijsko i erozijsko trošenje izabranog predstavnika visokolegiranih alatnih čelika za hladni rad X155Cr-V-Mo12-1 ali i prikazati dosadašnje spoznaje o utjecaju dubokog hlađenja na svojstva visokolegiranih alatnih čelika za hladni rad.

1.2 Visokolegirani alatni čelici za hladni rad

To su čelici široke primjene, najčešće kao štance, noževi, matrice za vučenje žice, profilni alati, valjci, alati za prešanje, alati za hladno oblikovanje, alati za utiskivanje, alati za istiskivanje, glodala, kalibri za provrte i navoje itd. [1].

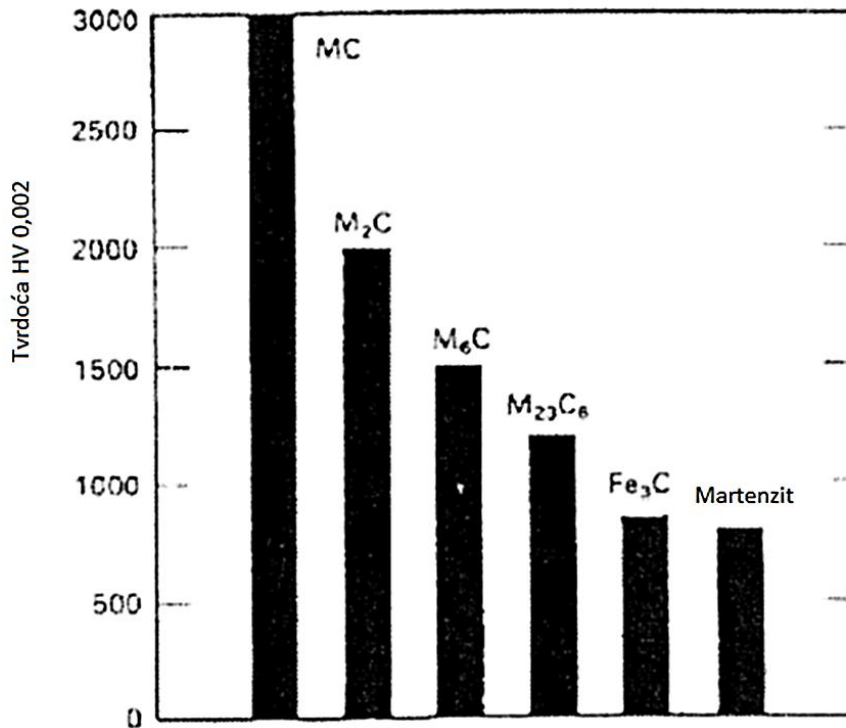
Kao i svi visokolegirani čelici i alatni sadrže više od 5% ukupnih legirajućih dodataka od kojih se ističu Cr sa visokim udjelom preko 5%, te dodaci V, Mo i/ili W. Udio ugljika u ovim čelicima je između 1 i 2 %C. Cr se smatra glavnim legirnim elementom ove vrste čelika i njegov sadržaj u čeliku određuje bitne karakteristike promatranog čelika[1].

S obzirom na sastav, mikrostrukturu i istaknuta svojstva karakteristične su tri podgrupe čelika[1]:

1. Čelici s oko 5% Cr
2. Visokouglični ledeburitni čelici s oko 12% Cr
3. Martenzitni nehrđajući čelici

Krom spada u grupu jakih karbidotvoraca pa legiranje čelika njime dovodi do stvaranja nekoliko vrsta karbida: i s udjelom kroma oko 91% ili s oko 94% [2].

Nastanak pojedine vrste karbida ovisi općenito o udjelu kroma i o udjelu ugljika u čeliku, ove vrste karbida općenito povisuju otpornost trošenju iako literatura navodi da je tip karbida MC tvrdi i teže rastvorljiv od ostalih (slika 1) pa je samim time i poželjniji tip karbida. Moguća je i pojava vanadijevih karbida tipa MC kod čelika s oko 4% V koji mogu zadržati tvrdoću i otpornost na trošenje i pri višim temperaturama [2].



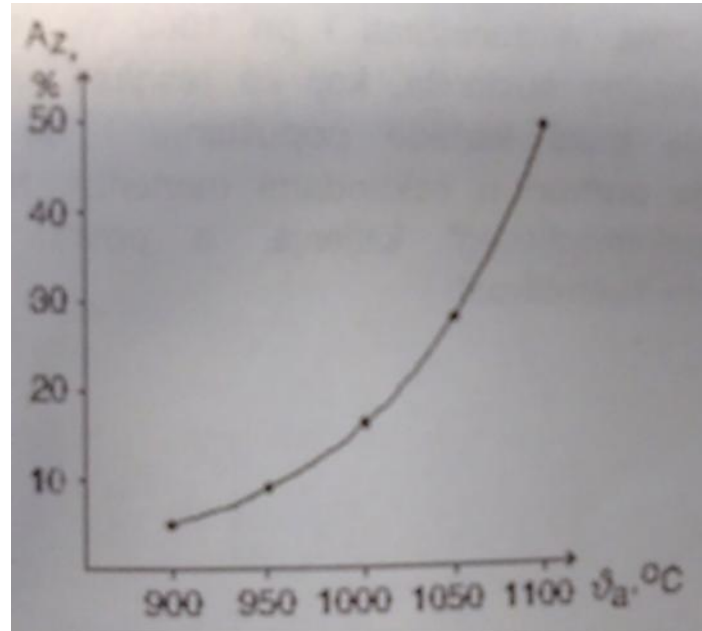
Slika 1. Tvrdoće pojedinih vrsta karbida [3]

Povišenjem masenog udjela kroma smanjuje se eutektoidna koncentracija i povišuju temperature pretvorbe, što znači da raste potrebna temperatura austenitizacije. Također se povećava količina neotopljenih karbida u austenitu pa će nakon kaljenja biti viši udio slobodnih karbida koji znatno povišuju otpornost na trošenje [2].

Također smanjenje eutektoidne koncentracije povišuje udio karbida nerastvorenih pri temperaturi austenitizacije (sekundarni i eutektički karbidi). Ovi karbidi, srazmjerno njihovoj vrsti i količini, povišuju otpornost na trošenje nakon kaljenja. Valja spomenuti i još efikasnije u pogledu otpornosti na trošenje, karbide popuštanja stvorene u IV. stadiju popuštanja. No, da bi se izazvala reakcija IV. stadija popuštanja tj. stvaranje karbida popuštanja i sekundarnog martenzita trebalo bi austenitizirati pri znatno višim temperaturama nego što je uobičajeno što bi naposljetku dovelo do jakog rasta austenitnog zrna a time i do pada duktilnosti [2].

Bitno je naglasiti međuovisnost sadržaja ugljika, korozijske postojanosti i otpornosti na trošenje. Naime manji sadržaj ugljika u čeliku uz $\%C = \text{const.}$ dovodi do više otopljenog kroma u austenitu (i martenzitu) te će čelik postajati sve otporniji na koroziju, analogno što je viši sadržaj ugljika u čeliku to će i austenit (ili martenzit) sadržavati više ugljika te će postići veća zakaljivost a time i otpornost na trošenje [2].

Najznačajnija pojava kod svih tipova visokolegiranih alatnih čelika za hladni rad jest pojava zaostalog austenita u gašenom stanju, slika 2.



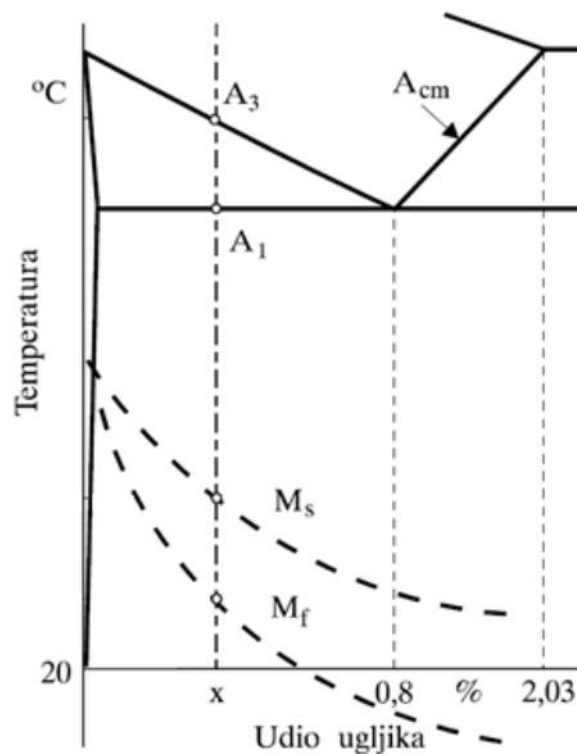
Slika 2. Udio zaostalog austenita u visokolegiranom alatnom čeliku X155CrNiVMo 12-1 ovisno o temperaturi austenitizacije [2]

Viši udio zaostalog austenita je nepoželjan zbog negativnog njegovog djelovanja na svojstva čelika i to na 2 načina [2]:

- a) Postupna spontana transformacija u martenzit i pri 20 °C što izaziva promjenu dimenzija i povisuje krhkost
- b) Transformacija u tzv. deformacijski martenzit pod djelovanjem visokih lokalnih tlakova što uzrokuje lokalnu krhkost, pukotine i sl.

Zaostali austenit nastaje zbog sniženja granica pretvorbe M_s i M_f na vrijednosti oko i ispod sobne temperature, slika 3. Sniženje granica pretvorbe uzrokuju gotovo svi legirni elementi (osim Co) kao i povišen sadržaj ugljika. Zaostali austenit može se ukloniti uzastopnim popuštanjem ili ohlađivanjem gašenog proizvoda na temperaturu ispod M_f (duboko hlađenje).

[4]



Slika 3. Uptonov dijagram [4]

1.3 Proces toplinske obrade

Čimbenici koji značajno utječu na mikrostrukturu a time i dobivena svojstva alatnih čelika su: kemijski sastav čelika, postupak proizvodnje i provedena toplinska obrada [4].

Toplinska obrada se primjenjuje kod čelika u svrhu poboljšanja svojstava. Konvencionalna toplinska obrada čelika se sastoji od kaljenja i popuštanja. No ona primjerice kod visokolegiranih čelika za hladni rad ne uspijeva pretvoriti dovoljnu količinu austenita u martenzit što nepovoljno utječe na svojstva čelika zbog prevelike količine zaostalog austenita. Stoga se u konvencionalni proces toplinske obrade dodaje proces dubokog hlađenja i to odmah nakon kaljenja a prije popuštanja, slika 4.



Slika 4. Poželjan slijed toplinske obrade za čelike koji se podvrgavaju dubokom hlađenju [5]

1.3.1 Kaljenje

Postupak toplinske obrade koji se sastoji od ugrijavanja na određenu temperaturu austenitizacije i brzog ohlađivanja na temperaturu okoline u prikladnom mediju (voda, ulje ili zrak). Važniji parametri postupka su: temperatura austenitizacije θ_a , vrijeme držanja na temperaturi austenitizacije t , te brzina ohlađivanja. [4]

Temperatura austenitizacije θ_a jedan je od važnijih parametara procesa: vrlo visoke temperature austenitizacije omogućuju otapanje dovoljne količine karbida što daje dovoljnu količinu ugljika i legirnih elemenata u austenitu.

Predugo držanje na previsokoj temperaturi austenitizacije može dovesti do značajnog povišenja austenitnog zrna što nije poželjno, također može dovesti do stvaranja sitnih karbida i njihove koagulacije na granicama austenitnog zrna, pa čak i do lokalnog taljenja.

Visina temperature austenitizacije ovisi i o namjeni alata koji se toplinski obrađuje: više temperature austenitizacije se odabiru za alate koji će raditi na povišenim temperaturama a zahtijevaju visoku tvrdoću, dok se niže temperature odabiru za alate za hladni rad gdje je važnija žilavost.

Nakon ugrijavanja i držanja na temperaturi austenitizacije čelik se mora brzo ohladiti na temperaturu okoline. Nakon ovakve obrade uvijek postoji dio zaostalog austenita čiji udio, ovisno o vrsti čelika može biti do 20-30% i više.

1.3.2 Duboko hlađenje

Duboko hlađenje je toplinska obrada koja izvodi na vrlo niskim temperaturama (ispod 190°C) u svrhu promjene mikrostrukture čelika i poboljšanja njegovih svojstava. Rashladna sredstva su najčešće plinovi poput dušika, helija, kisika, vodika ili neona. Proces je ekološki prihvativ i vjeruje se da znatno poboljšava svojstva alatnih čelika.

Razlog primjene dubokog hlađenja su dva metalurška procesa: transformacija zaostalog austenita u martenzit uz istovremeni raspad martenzita te početak nukleacije zrna uz naknadnu precipitaciju finih karbida [6].

Parametri procesa su brzina hlađenja i trajanje dubokog hlađenja. [6]

Brzina hlađenja ne bi smjela biti prevelika (do 5°C/min), da bi se izbjegla značajna razlika između unutarnje i vanjske temperature gledano prema poprečnom presjeku. Također ovakvo sporije ohlađivanje utječe na sniženje zaostalih napetosti i sniženje žilavosti na obratku.

Potrebno trajanje procesa dubokog hlađenja nije precizno određeno, najčešće se smatra da mora trajati između 12 i 84 sata. Za to vrijeme mora se postići željena fazna transformacija u materijalu te precipitacija finih karbida.

1.3.3 Popuštanje

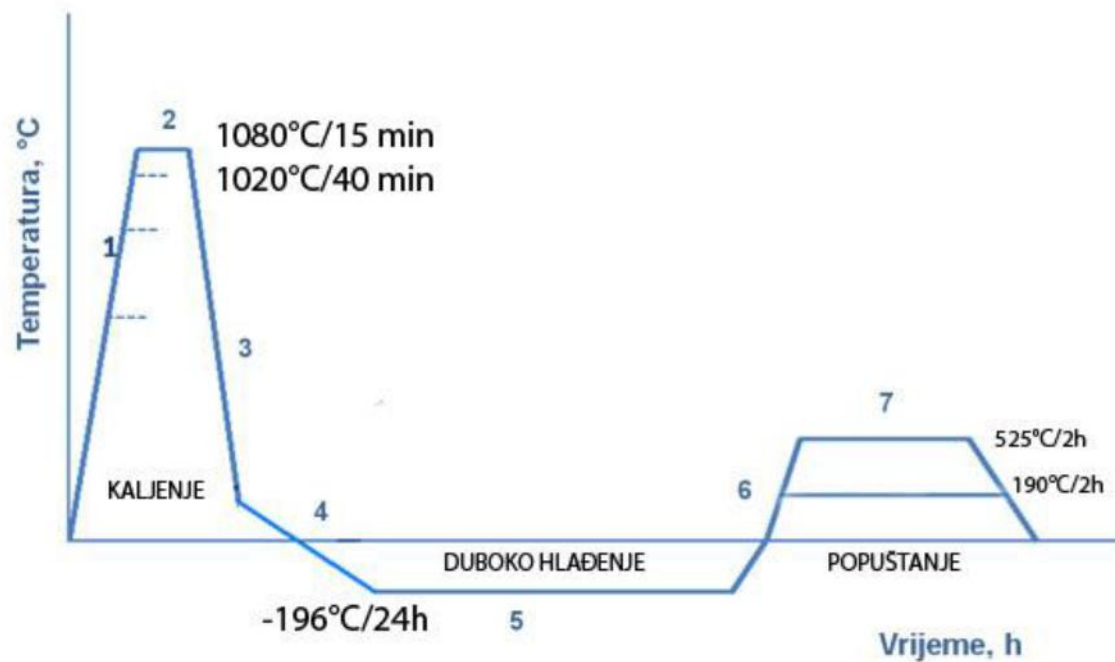
Popuštanje je toplinska obrada, nakon austenitizacije i gašenja, u svrhu postizanja određenih svojstava, prije svega žilavosti i duktilnosti. Popuštanje čini zagrijavanje na određenu temperaturu (ispod A1), držanje na toj temperaturi i ohlađivanje primjerenom brzinom. Postupak se može i više puta ponoviti[4].

Prema temperaturi popuštanja ϑ_p razlikujemo: niskotemperaturno popuštanje (manje od 220°C), srednjetemperaturno popuštanje (od 220°C do 400°C) te visokotemperaturno popuštanje (više od 400°C)[4].

Nakon kaljenja i dubokog hlađenja čelici imaju veliku tvrdoću, ali su veoma krhki zbog povišenog udjela martenzita. Popuštanjem se povećava žilavost i duktilnost kaljenog čelika, a smanjuje se tvrdoća.

Ovisno o materijalu vrijeme popuštanja varira no to je obično nekoliko sati, a neki materijali bolje reagiraju u višestrukim ciklusima.

Tipičan dijagram toplinske obrade visokolegiranih alatnih čelika za hladni rad dan kod kojih treba provesti proces dubokog hlađenja dan je na slici 5.



Slika 5. Dijagram toplinske obrade za visokolegirane alatne čelike za hladni rad koji se podvrgavaju dubokom hlađenju [7]

Faze tehnološkog postupka prema slici su slijedeće [5]:

1. Austenitizacija čelika na temperaturi za koju će se dobiti najmanje zaostalog austenita A_z (uz obavezno predgrijavanje za konkretan čelik)
2. Držanje na temperaturi austenitizacije (vrijeme držanja ovisi o vrsti čelika), preporuka je da se materijal drži barem 24h na temperaturi dubokog hlađenja.
3. Gašenje nadkritičnom brzinom gašenja.
4. Početak procesa dubokog hlađenja uranjanjem u tekući dušik i ohlađivanjem na temperaturu -196°C .
5. Držanje na temperaturi dubokog hlađenja, trajanje ovisi o materijalu najčešće 24h.
6. Sporo zagrijavanje na sobnu temperaturu nakon držanja na temperaturi dubokog hlađenja.
7. Popuštanje čelika na temperaturama predviđenim za pojedinu vrstu čelika, dolazi do precipitacije η -karbida te sniženja zaostalih naprezanja u materijalu.

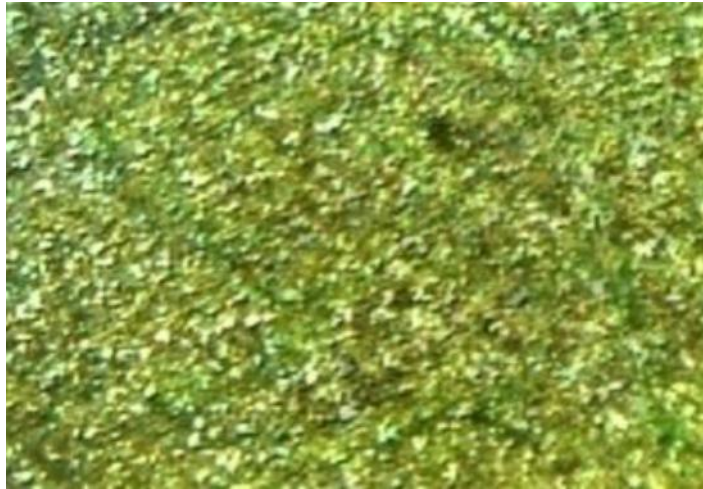
1.4 Utjecaj dubokog hlađenja na svojstva visokolegiranih alatnih čelika za hladni rad

1.4.1 Mikrostruktura

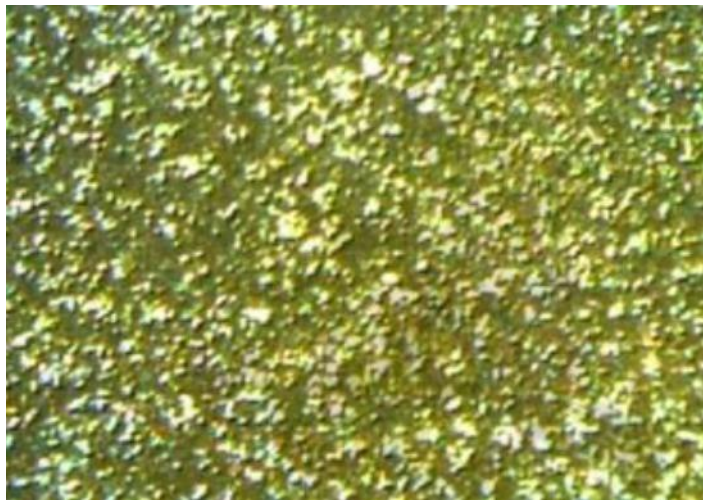
Temeljna svrha primjene dubokog hlađenja u toplinskoj obradi visokolegiranih alatnih čelika za hladni rad jest uklanjanje zaostalog austenita iz mikrostrukture čime se dobiva sekundarni martenzit u mikrostrukтури materijala koji povećava tvrdoću materijala a time i otpornost na trošenje materijala što je najvažnije zahtijevano svojstvo alatnih čelika. Valja istaknuti i da transformacija austenita u martenzit daje 4% porasta volumena izratka što uzrokuje promjenu dimenzija ali i stvaranje unutarnjih napetosti u materijalu.

Vrlo važnu ulogu u čitavom procesu toplinske obrade ima i završni proces popuštanja koji uzrokuje precipitaciju finih η karbida. Iako uloga tih karbida nije posve razjašnjena niti su snimljeni na mikroskopu, pretpostavka je da se nakon procesa popuštanja pojavljuju u mikrostrukтури i time poboljšavaju mehanička svojstva. [6]

Na slikama 6. i 7. vidimo mikrostrukтуру konvencionalno toplinski obrađenog alatnog čelika za hladni rad(D2) dok na slici vidimo mikrostrukтуру istog čelika koji je podvrgnut dubokom hlađenju između kaljenja i popuštanja. Može se uočiti povećana koncentracija precipitiranih karbida na uzorku koji je duboko hlađen kao i smanjeni udio zaostalog austenita. Stvaranjem visoke koncentracije karbida povećati će se otpornost na trošenje, imati će bolju otpornost na adhezijsko trošenje a i poboljšati će se dimenzijska stabilnost. [8]



Slika 6. Mikrostruktura konvencionalno obrađenog alatnog čelika (kaljenje+popuštanje) [8]



Slika 7. Mikrostruktura čelika koji je podvrgnut poželjnom režimu obrade(kaljenje+duboko hlađenje+popuštanje) [8]

1.4.2 Toplinska vodljivost i električna vodljivost

Primjenom dubokog hlađenja dolazi do poboljšanja toplinske vodljivosti, što je naročito bitno kod reznih alata gdje želimo odvesti toplinu od vrha alata što prije, čime produljujemo njegov vijek trajanja. Toplinska i električna vodljivost primarno ovise o slobodnim elektronima, pa se mogu staviti u funkciju po Wiedemann-Franz-Lorenzovom zakonu (jednadžba 1). Zakon govori da je za metale odnos toplinske vodljivosti (κ) prema električnoj vodljivosti (σ) direktno proporcionalan temperaturi (T) i vrijednosti konstante proporcionalnosti (L), koja je značajka svakog pojedinog materijala, poznata kao Lorenz-ov broj [9].

Jednadžba 1 Wiedemann-Franz-Lorenzov zakon

$$L = \frac{\kappa}{\sigma T} = \frac{\pi^2}{3} \left(\frac{k_B}{e} \right)^2 = 2.44 \times 10^{-8} \text{ W } \Omega \text{ K}^{-2} \quad [1]$$

κ (W/m·K)- toplinska vodljivost

σ (S·m⁻¹)- električna vodljivost

T (K) - temperatura

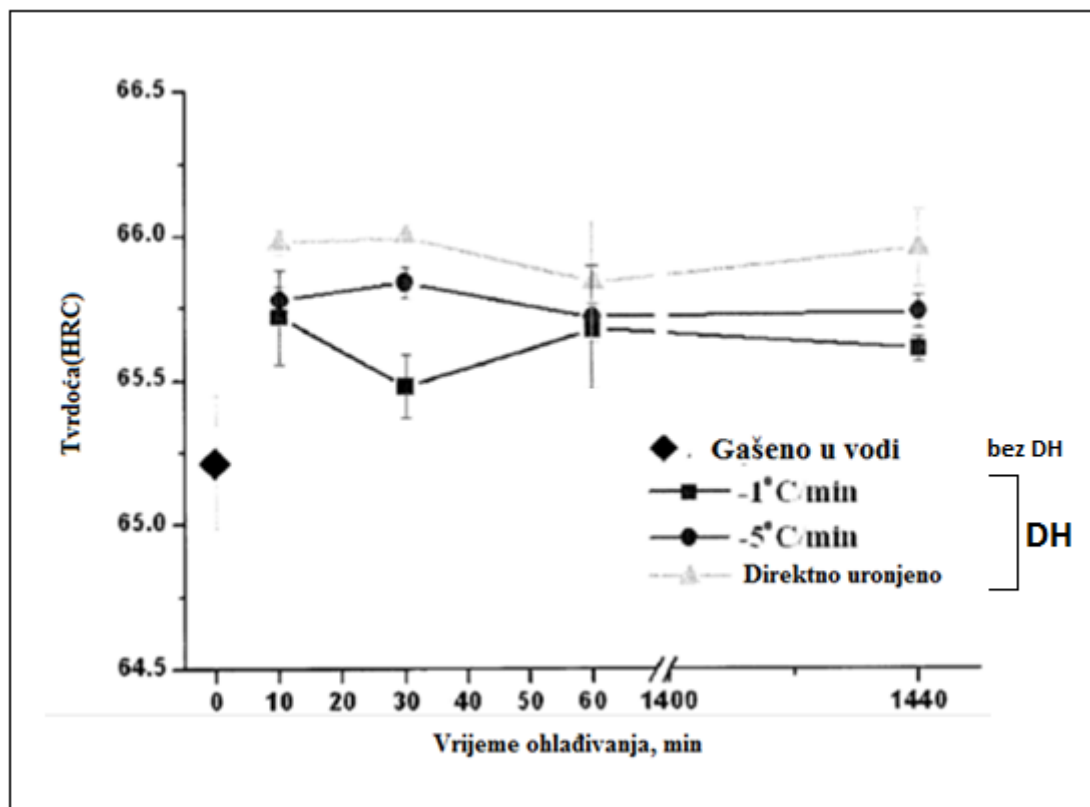
L - Lorenzov broj

1.4.3 Utjecaj na mehanička svojstva

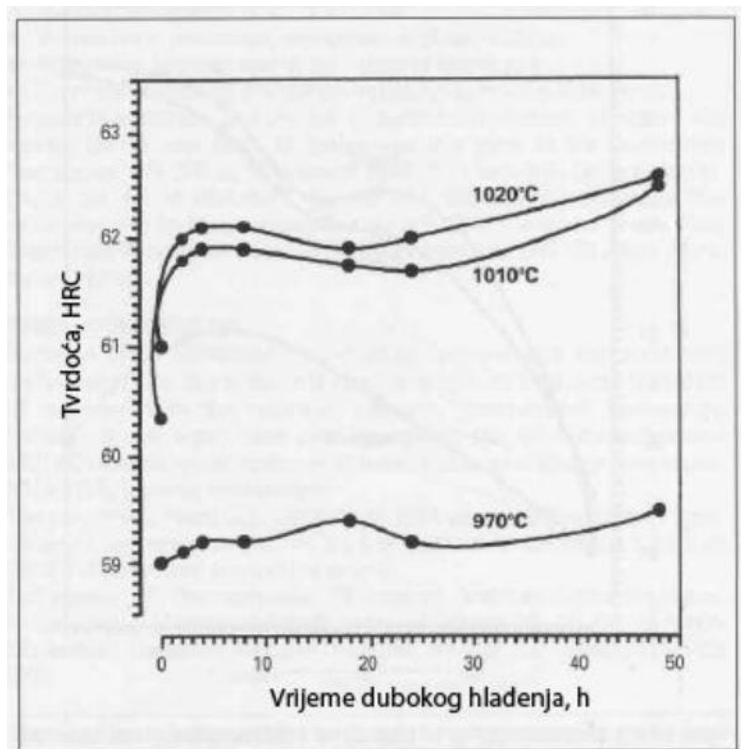
Tvrdoća

U dosadašnjim istraživanjima proces dubokog hlađenja pratio je i porast tvrdoće materijala najčešće između 1-3 HRC, ali porast tvrdoće ne bi smio pratiti pad žilavosti stoga je potrebno dobro optimizirati cijeli proces toplinske obrade materijala tj. odabrati za svaku vrstu čelika odgovarajuće režime grijanja i ohlađivanja kako bi se dobila najbolja moguća kombinacija željenih svojstava.

Tvrdoća ovisi o temperaturi austenitizacije, brzini ohlađivanja te trajanju dubokog hlađenja. Slike 8. i 9. prikazuju ovisnost postignute tvrdoće alatnog čelika o navedenim parametrima.



Slika 8. Utjecaj brzine gašenja i vremena držanja na temperaturi hlađenja na tvrdoću alatnog čelika X155CrNiVMo 12-1 [3]



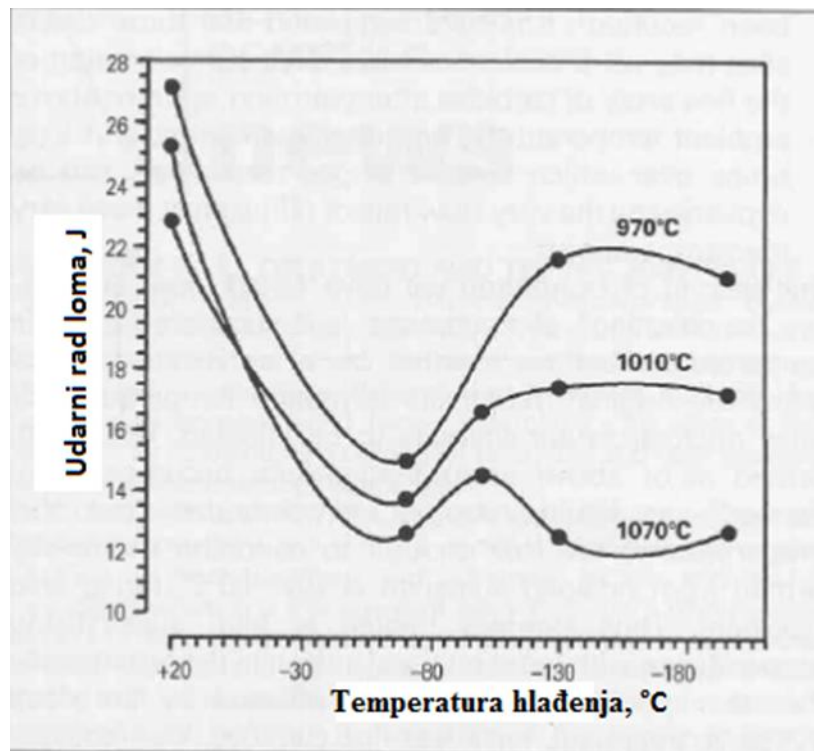
Slika 9. Utjecaj temperature austenitizacije i trajanja procesa dubokog hlađenja na tvrdoću alatnog čelika X155CrNiVMo 12-1 [10]

Žilavost

Žilavost je vrlo važno svojstvo alatnog čelika jer predstavlja otpornost propagaciji pukotina oko neizbježnih nepravilnosti u materijalu (pukotine, praznine, uključine itd.).

Nakon samog procesa dubokog hlađenja dolazi do transformacije austenita u martenzit što dovodi do porasta tvrdoće ali i zamjetnog pada žilavost, čak i do 40% mjereno na Charpyevom batu. Stoga je važno duboko hlađeni čelik podvrgnuti popuštanju radi krhkog martenzita i precipitacije finih karbida čime dolazi do poboljšanja žilavosti.

Također na žilavost alatnog čelika utječe i odabir temperature austenitizacije kao što je prikazano na slici. Bolju žilavost imaju čelici austenitizirani na nižoj temperaturi upravo zbog više zaostalog austenita u strukturi ali u konačnici oni imaju nižu tvrdoću od onih austenitiziranih na višoj temperaturi [10], slika 10.



Slika 10. Utjecaj temperatura hlađenja i austenitizacije na udarni rad loma alatnog čelika za hladni rad [10]

Zaostala naprezanja

Zaostala naprezanja u materijalu mogu nastati uslijed toplinskih ili mehaničkih opterećenja te nakon faznih promjena u mikrostrukturi, nepoželjna su u materijalu jer uzrokuju razne štetne pojave poput pukotina, deformacija te neželjenog skupljanja ili širenja materijala.

Nakon gašenja sa temperature austenitizacije na vanjskim površinama obratka dolazi do bržeg ohlađivanja i fazne transformacije austenita u martenzit dok se unutarne površine sporije hlade i time sporije teče proces fazne transformacije. Stoga se u materijalu pojavljuju zaostala naprezanja koja mogu uzrokovati pukotine i sl. [8]

Proces dubokog hlađenja nakon gašenja omogućuje nastavak fazne transformacije zaostalog austenita u martenzit, što ima za posljedicu porast volumena izratka do 4% čime se također stvaraju zaostale napetosti u materijalu.

Stoga je potrebno primijeniti proces popuštanja nakon dubokog hlađenja da bi se smanjila krhkost novonastalog martenzita u mikrostrukturi te uklonila zaostala naprezanja.

Otpornost na umor materijala

To je važno svojstvo za alatne čelike koji se u radu susreću za izmjeničnim naprezanjima pri povišenim temperaturama. Svojstvo koje do sada nije dovoljno istraženo iako se smatra da proces dubokog hlađenja ima povoljan učinak i na to svojstvo [8].

Vlačna čvrstoća

Malo se zna o utjecaju dubokog hlađenja na vlačnu čvrstoću ali je primijećeno kod nekih čelika i magnezijevih legura znatan porast vlačne čvrstoće nakon dubokog hlađenja.

Zbog fazne transformacije austenita u martenzit i precipitacije finih karbida vjeruje se da postoji porast vlačne čvrstoće ali je utjecaj procesa dubokog hlađenja na to svojstvo nedovoljno istražen. [8].

1.5 Otpornost na trošenje

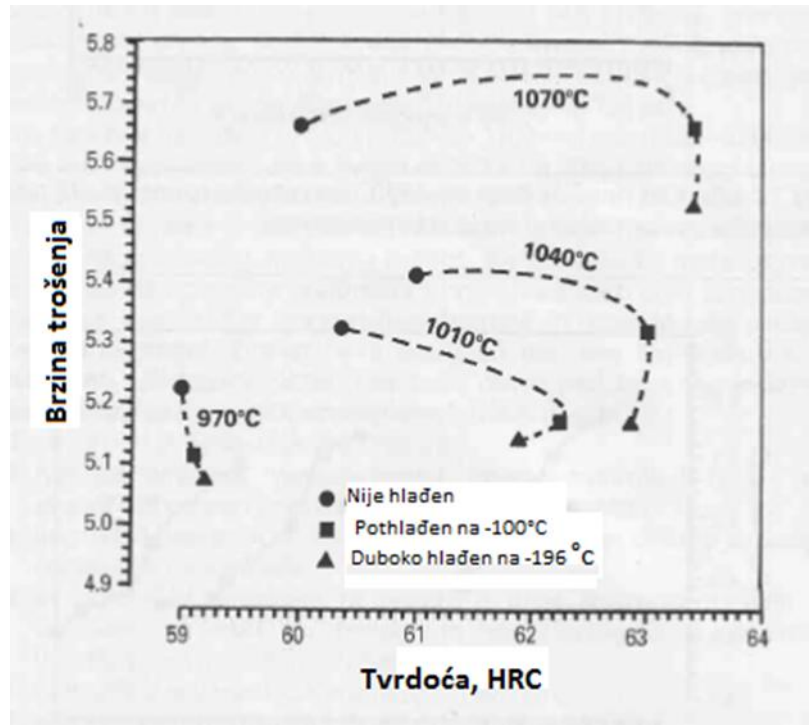
Utvrđeno je da čelici podvrgnuti dubokom hlađenju imaju veću otpornost na trošenje u usporedbi sa konvencionalno obrađenim čelicima. Razlog je fazna transformacija austenita u martenzit čime se povisuje tvrdoća ali i naknadna precipitacija finih karbida u ranom stadiju popuštanja nakon procesa dubokog hlađenja.

Veličina i raspored tih karbida također imaju značajan utjecaj na samu otpornost na trošenje, što su gušći i sitniji time će otpornost na trošenje biti veća.

Najčešći mehanizmi trošenja koji se primjenjuju u ispitivanju otpornosti materijala su abrazijski i erozijski mehanizam trošenja.

Dosadašnja istraživanja imaju vrlo raznolika rješenja. Neki autori govore o znatnim poboljšanjima otpornosti na trošenje, primjerice Collins i Dormer smatraju da se kod pojedinih vrsta čelika to svojstvo može poboljšati i za 100% [10]. Slika 11. daje primjer iz njihovog istraživanja gdje se jasno vidi utjecaj temperature austenitizacije i procesa dubokog hlađenja,

gdje duboko hlađeni uzorci u skupini sa pothlađenim i konvencionalno obrađenim uzorcima pokazuju najveću otpornost na trošenje.



Slika 11. Međuovisnost tvrdoće, brzine trošenja i režima ohlađivanja alatnog čelika[10]

2. EKSPERIMENTALNI DIO

2.1. Cilj istraživanja

U svrhu ispitivanja utjecaja dubokog hlađenja na svojstva (otpornost na trošenje) alatnih čelika za hladni rad provedena su opsežna tribološka ispitivanja. Cilj je utvrditi da li proces dubokog hlađenja i parametri toplinske obrade (temperatura austenitizacije i popuštanja) imaju utjecaj na postignutu otpornost na trošenje visokolegiranog alatnog čelika za hladni rad. U ovom radu izabrani predstavnik skupine je alatni čelik oznake X155CrVMo 12-1.

Eksperimentalni dio se sastoji od dva dijela: ispitivanje otpornosti čelika na abrazivnu eroziju finim pijeskom i ispitivanje otpornosti čelika na abraziju.

Promjene masa uzoraka uslijed trošenja mjerene su preciznom vagom i rezultati su prikazani u komparativnim dijagramima.

2.2 Plan pokusa

Ispitni uzorci predviđeni za tribološka ispitivanja otpornosti na abrazijsko i erozijsko trošenje podijeljeni su prema odabranim parametrima toplinske obrade u 8 skupina, tablica 1. Nakon provedene toplinske obrade nad uzorcima slijedi tribološko ispitivanje otpornosti uzoraka na abrazijsko i erozijsko trošenje.

Tablica 1. Oznake skupina uzoraka

	bez dubokog hlađenja		duboko hlađeno (I)	
$\vartheta_a, ^\circ\text{C}$	$\vartheta_{p1}=190\ ^\circ\text{C}$	$\vartheta_{p2}=525\ ^\circ\text{C}$ (2)	$\vartheta_{p1}=190\ ^\circ\text{C}$	$\vartheta_{p2}=525\ ^\circ\text{C}$ (2)
1020		2	I	I2
1080 (*)	*	*2	*I	*I2

*- $\vartheta_a = 1080\ ^\circ\text{C}$; I-duboko hlađeno ; 2- $\vartheta_{p2}=525\ ^\circ\text{C}$

2.3 Ispitivani materijal i priprema

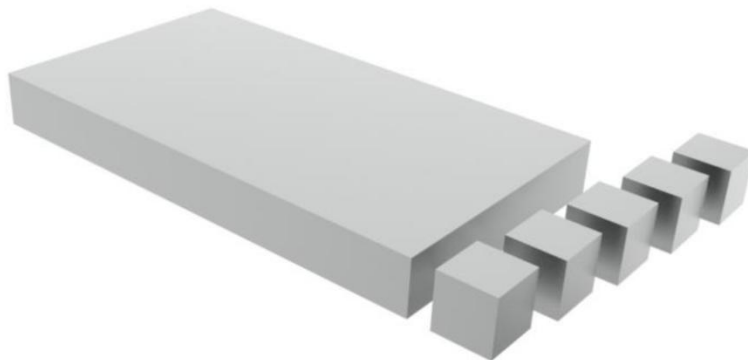
Izabrani predstavnik skupine visokolegiranih alatnih čelika za hladni rad jest čelik oznake X155CrVMo12-1 proizveden prema specifikaciji proizvođača BÖHLER EDELSTAHL. Kemijski sastav izabranoga predstavnika ispitan je u Laboratoriju za analizu metala FSB-a te su rezultati dani u tablici 2.

Tablica 2. Kemijski sastav ispitanog čelika X155CrNiVMo12-1

%									
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V	Cu
1,56	0,3	0,31	0,021	0,0006	11,19	0,7	0,27	0,72	0,05

Čelik je isporučen u obliku ploče dimenzija 100x30 mm, dužine 600 mm. Od te ploče izrezani su uzorci adekvatnih dimenzija i oblika za daljnju obradu i predviđena tribološka ispitivanja na abraziju i eroziju.

Dimenzija uzoraka za erozijska ispitivanja je 18x18x18mm (slika 12.) dok je za abrazijska ispitivanja 76x25x12.7mm (slika 13.).



Slika 12. Skica izrade uzoraka za erozijsko ispitivanje [11]



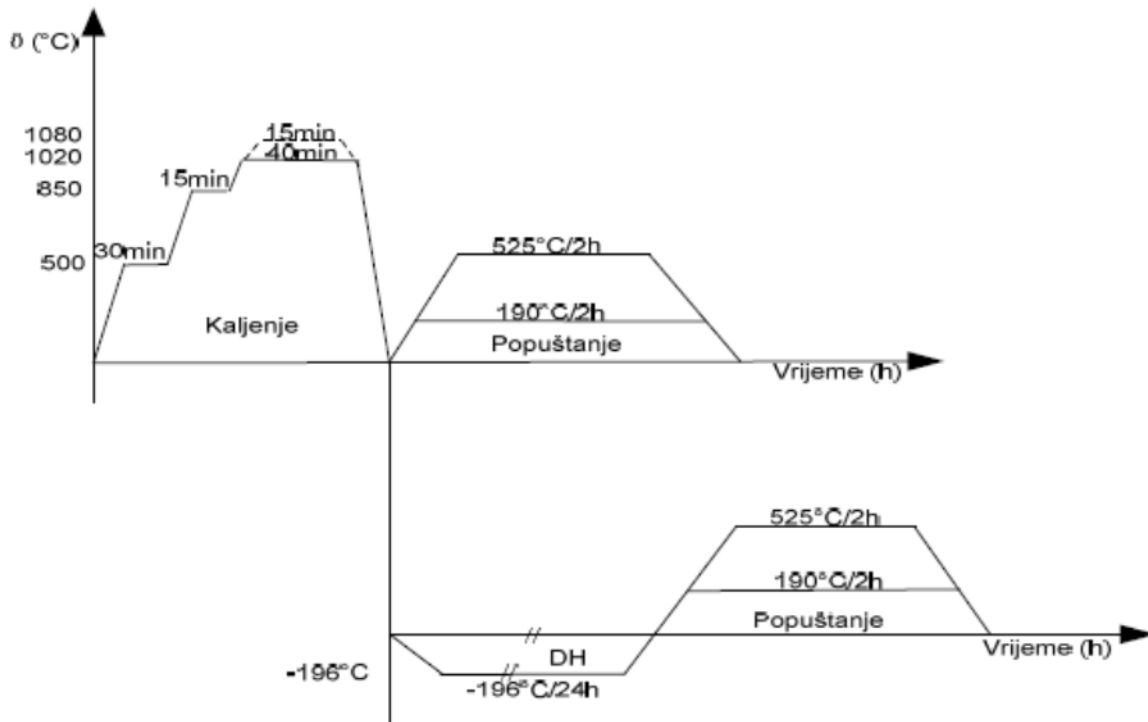
Slika 13. Uzorci za abrazijsko ispitivanje

2.4 Toplinska obrada uzoraka

Toplinska obrada uzoraka provedena je u Laboratoriju za toplinsku obradu Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Prema odabranim parametrima toplinske obrade imamo ukupno 8 režima obrade a time i 8 tipova uzoraka. Prvo je provedeno predgrijavanje u vakuumskoj peći na odabranim temperaturama 500°C/30 min, 850°C/15 min. Nakon toga slijedi austenitizacija na dvije odabrane temperature: 1020°C/40 min jedna skupina uzoraka i 1080°C/15 min druga skupina uzoraka.

Kaljenje je provedeno u vakuumskoj peći gdje je kao zaštita korišten vakuum i to sa parametrima 5×10^{-3} bara do temperature 700°C a nakon toga do 10⁻¹ bara radi zaštite čelika zbog osjetljivosti nekih legirnih elemenata na isparivanje.

Dio uzoraka uranja se u tekući dušik na -196°C, a ostatak ide na visoko ili nisko popuštanje prema planu pokusa. Nakon 24 sata držanja na temperaturi dubokog hlađenja uzorci se vraćaju na temperaturu okoline i odlaze na visoko ili nisko popuštanje u peći bez zaštitne atmosfere, prema planu pokusa, slika 14.



Slika 14. Dijagram toplinske obrade uzoraka za abrazivsko i erozijsko ispitivanje

2.5 Ispitivanje otpornosti na erozijsko trošenje

Na raspolaganju imamo 32 uzorka podijeljenih u 8 kategorija toplinske obrade što znači da je za jednu vrstu ciklusa toplinske obrade izrađeno 4 uzorka. Da bi se izbjegla uzastopna greška računalno je generiran redoslijed izvođenja ispitivanja otpornosti na erozijsko trošenje kako je prikazano u tablici 3.

Pod oznakom std se nalazi redni broj uzorka prije nasumičnog odabira, ϑ_a , ϑ_p i DH su oznake za temperaturu austenitizacije, temperaturu popuštanja i duboko hlađenje.

Tablica 3. Redoslijed izvođenja ispitivanja otpornosti na erozijsko trošenje

<u>std</u>	<u>run</u>	θa	θp	DH	<u>oznaka</u>
4	1	1080	190	DA	*1
2	2	1020	190	NE	/
11	3	1080	190	DA	*1
19	4	1080	525	DA	*12
17	5	1020	525	DA	12
15	6	1080	190	DA	*1
24	7	1080	190	NE	*
5	8	1020	190	NE	/
23	9	1020	525	DA	12
30	10	1080	525	DA	*12
20	11	1080	190	DA	*1
12	12	1080	525	DA	*12
10	13	1080	525	NE	*2
27	14	1080	190	NE	*
3	15	1020	190	DA	1
6	16	1020	525	DA	12
31	17	1020	190	DA	1
13	18	1080	525	NE	*2
8	19	1020	190	DA	1
25	20	1080	190	NE	*
22	21	1020	525	NE	2
8	22	1020	190	DA	1
32	23	1020	525	NE	2
26	24	1080	525	NE	*2
9	25	1020	525	DA	12
7	26	1020	190	NE	/
28	27	1020	525	NE	2
29	28	1020	190	NE	/
18	29	1020	525	NE	2
16	30	1080	190	NE	*
1	31	1080	525	DA	*12
21	32	1080	525	NE	*2

2.5.1 Opis postupka ispitivanja otpornosti na abrazivnu eroziju

Ispitivanje otpornosti na abrazivnu eroziju provedeno je u Laboratoriju za tribologiju Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

Na slici 15. vidi se uređaj za ispitivanje otpornosti na abrazivnu eroziju. Ispitivati se mogu istovremeno dva uzorka koja se umeću u čahure koje se nalaze na rotirajućem dijelu uređaja. Dok uzorci rotiraju na njih udaraju zrnca pijeska koja padaju odozgo pod utjecajem gravitacije, (slika 16.). Sudaranjem uzoraka sa pijeskom dolazi do trošenja samog uzorka.

Parametri procesa ispitivanja su: brzina vrtnje uređaja, granulacija pijeska te kut udara čestica pijeska. [11]

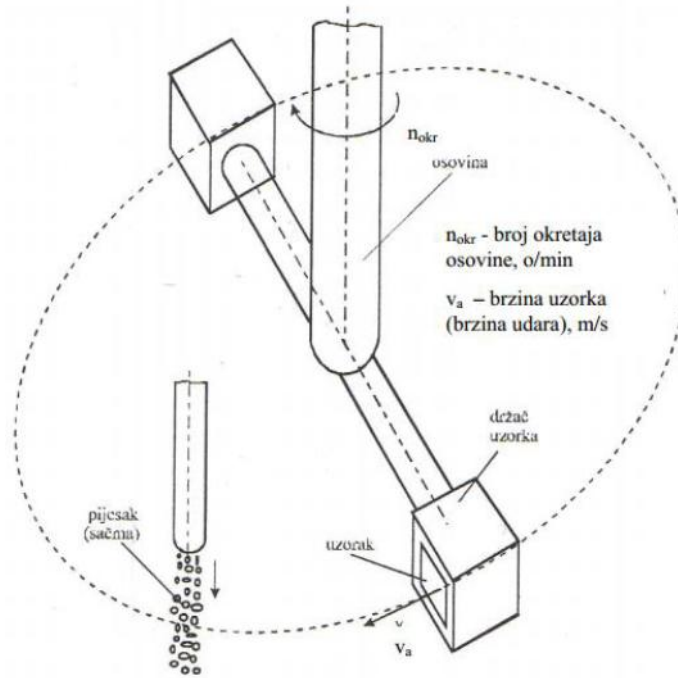
U ovom istraživanju brzina vrtnje uređaja bila je 1044 okretaja u minuti, pijesak koji se koristi u procesu (erodent) imao je veličinu zrna 0,063-0,355mm (slika 17.) dok je kut udara čestica bio 30° (abrazivna erozija).



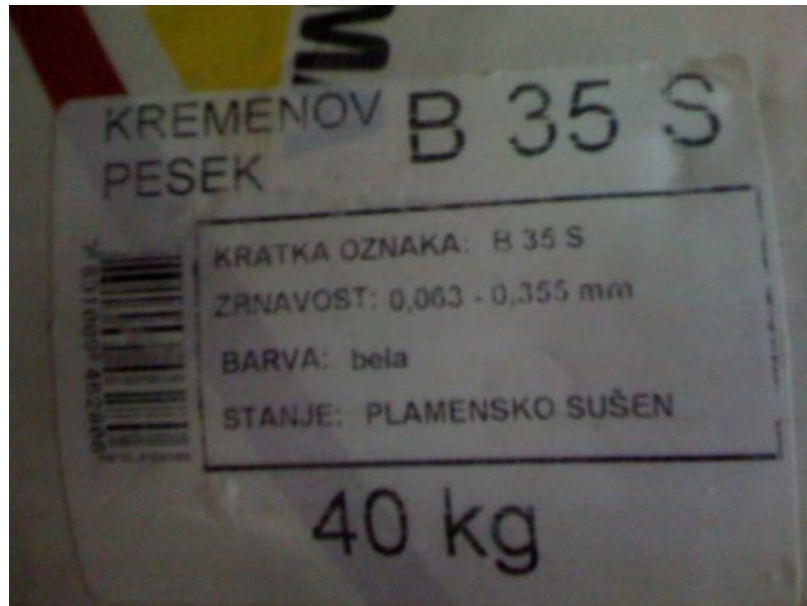
Slika 15. Uređaj za ispitivanje otpornosti na eroziju[11]

Dijelovi uređaja za ispitivanje otpornosti na eroziju su sljedeći[11]:

- 1 – kućište elektromotora sa prekidačima,
- 2 – lijevak za dovod pijeska (erodenta),
- 3 – zaštitni bubanj s odvodom pijeska,
- 4 – utezi za pridržavanje bubnja,
- 5 – spremnik već korištenog pijeska



Slika 16. Detalj A (slika 2.4) sa shematskim prikazom osovine, sapnice, nosača i putanje uređaja za ispitivanje trošenja erozijom [11]



Slika 17. Oznaka i karakteristike pijeska korištenog u ispitivanju erozijskog trošenja

Ukupno trajanje erozijskog ispitivanja za svaki uzorak bilo je 45 minuta. Uzorak se vagao prije prvog ispitivanja, te se potom nakon svakih 15 minuta proces ispitivanja zaustavljao da bi izmjerili gubitak mase izazvan trošenjem na ispitnom uređaju, što znači da za svaki uzorak imamo 4 mjerenja. Prije svakog vaganja uzorak se morao čistiti nekoliko minuta u ultrazvučnoj otopini da bi bio što čišći a time i da bi sami rezultati bili što točniji. Za precizno vaganje uzoraka koristili smo vagu Mettler B5C 1000.

2.5.2 Rezultati ispitivanja

Mase uzoraka mjere se u gramima, u četiri decimale. U tablici 4. su prikazani rezultati svih mjerenja na uzorcima sa oznakama uzoraka, njihovim parametrima procesa toplinske obrade i u konačnici je izračunat ukupni gubitak mase uzorka nakon 45 minuta trošenja na uređaju za ispitivanje.

Tablica 4. Rezultati erozijskog ispitivanja

std	run	Ta	TP	DH	Oznaka uzorka	m0	m1 15min	m2 30min	m3 45min	m3-m0
4	1	1080	190	DA	*1	44,6046	44,6022	44,5951	44,5933	0,0113
2	2	1020	190	NE	/	44,6488	44,6438	44,6389	44,6361	0,0127
11	3	1080	190	DA	*1	44,6039	44,6004	44,5956	44,5939	0,01
19	4	1080	525	DA	*12	44,6046	44,6022	44,5951	44,5933	0,0113
17	5	1020	525	DA	12	44,5886	44,5833	44,579	44,5757	0,0129
15	6	1080	190	DA	*1	44,6597	44,6554	44,6506	44,648	0,0117
24	7	1080	190	NE	*	44,6323	44,6275	44,624	44,6213	0,011
5	8	1020	190	NE	/	44,6504	44,6459	44,6411	44,6389	0,0115
23	9	1020	525	DA	12	44,5932	44,5899	44,5841	44,5789	0,0143
30	10	1080	525	DA	*12	44,6594	44,6553	44,6514	44,6453	0,0141
20	11	1080	190	DA	*1	44,6244	44,619	44,6121	44,6077	0,0167
12	12	1080	525	DA	*12	44,6403	44,6349	44,6282	44,6237	0,0166
10	13	1080	525	NE	*2	44,5719	44,5655	44,5598	44,555	0,0169
27	14	1080	190	NE	*	44,6255	44,6222	44,617	44,6119	0,0136
3	15	1020	190	DA	1	44,6251	44,6221	44,6167	44,6124	0,0127
6	16	1020	525	DA	12	44,6417	44,6378	44,6329	44,6281	0,0136
31	17	1020	190	DA	1	44,626	44,6213	44,6154	44,61	0,016
13	18	1080	525	NE	*2	44,6746	44,6684	44,6629	44,6578	0,0168
8	19	1020	190	DA	1	44,6432	44,6408	44,6359	44,6302	0,013
25	20	1080	190	NE	*	44,6211	44,6191	44,6148	44,6098	0,0113
22	21	1020	525	NE	2	44,6262	44,6179	44,6122	44,6073	0,0189
8	22	1020	190	DA	1	44,6163	44,611	44,6031	44,5994	0,0169
32	23	1020	525	NE	2	44,6403	44,6346	44,6296	44,6229	0,0174
26	24	1080	525	NE	*2	44,662	44,6543	44,6488	44,6428	0,0192
9	25	1020	525	DA	12	44,6397	44,6354	44,6315	44,6291	0,0106
7	26	1020	190	NE	/	44,6373	44,626	44,6217	44,6178	0,0195
28	27	1020	525	NE	2	44,6806	44,649	44,6698	44,6639	0,0167
29	28	1020	190	NE	/	44,6447	44,6399	44,6337	44,6267	0,018
18	29	1020	525	NE	2	44,6414	44,6359	44,6309	44,6258	0,0156
16	30	1080	190	NE	*	44,6093	44,6054	44,5963	44,5902	0,0191
1	31	1080	525	DA	*12	44,6451	44,6399	44,6342	44,6295	0,0156
21	32	1080	525	NE	*2	44,6368	44,6297	44,6239	44,6184	0,0184

m1- izmjerena masa nakon 15 minuta trošenja

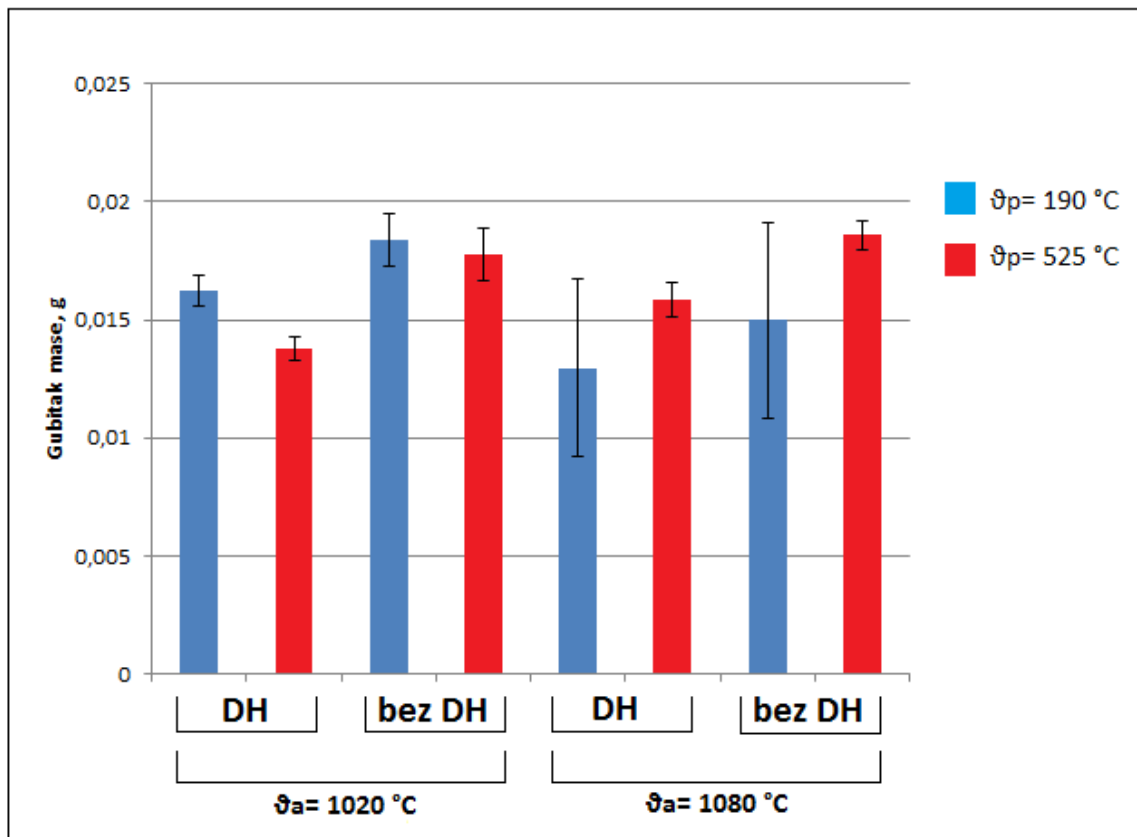
m2- izmjerena masa nakon 30 minuta trošenja

m3- izmjerena masa nakon 45 minuta trošenja

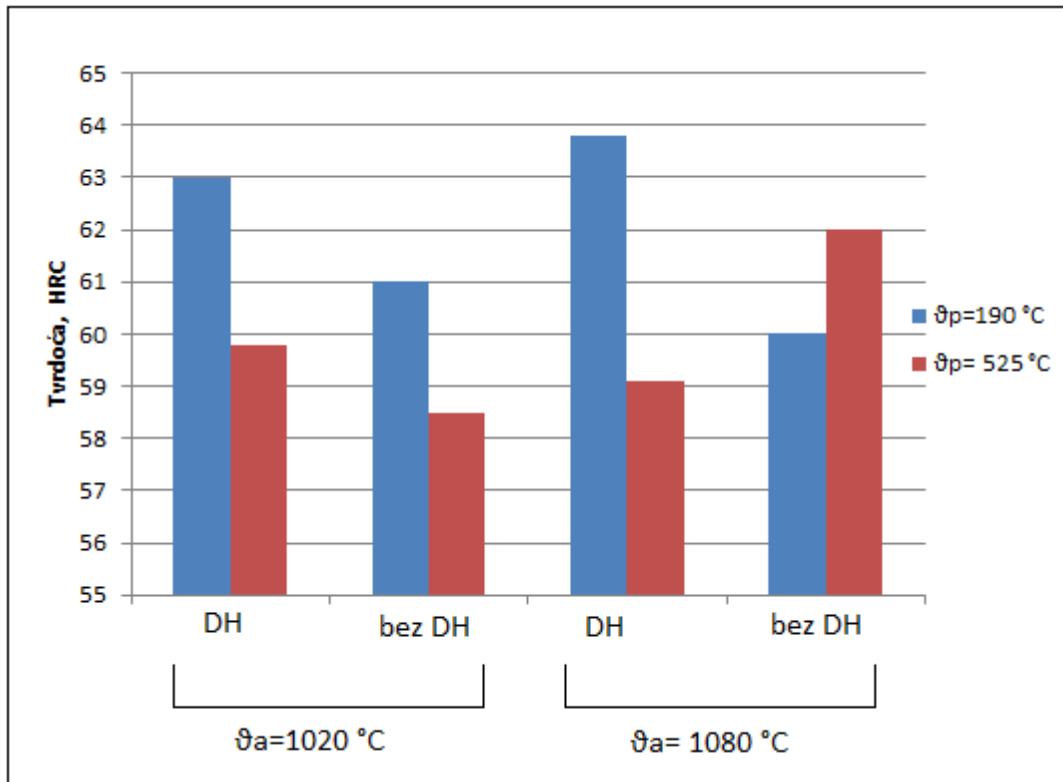
m3-m0- ukupni gubitak mase nakon 45 minuta trošenja

Rezultati su radi jednostavnosti prikazani dijagramski na slici 18. gdje je prikazan ukupan prosječni gubitak mase nakon 45 minuta ispitivanja za svaku skupinu uzoraka. Svaki stupac se sastoji od 4 izmjerene vrijednosti gubitka mase pošto imamo 4 uzorka po skupini.

Također su prikazane prosječne izmjerene tvrdoće za svaku skupinu uzoraka na slici 19.



Slika 18. Prosječni ukupni gubici mase u erozijskom ispitivanju za svaku skupinu uzoraka od čelika X155CrNiVMo 12-1



Slika 19. Prosječne izmjerene tvrdoće uzoraka od čelika X155CrNiVMo12-1 za erozijsko ispitivanje[12]

2.5.3 Analiza rezultata ispitivanja otpornosti na erozijsko trošenje

Objekti skupine visokopopuštenih uzoraka koje nisu duboko hladjene su pokazale nešto višu sklonost ka trošenju dok su najbolju otpornost na trošenje pokazali uzorci koji su austenitizirani na nižoj temperaturi potom duboko hladjeni i nisko popušteni.

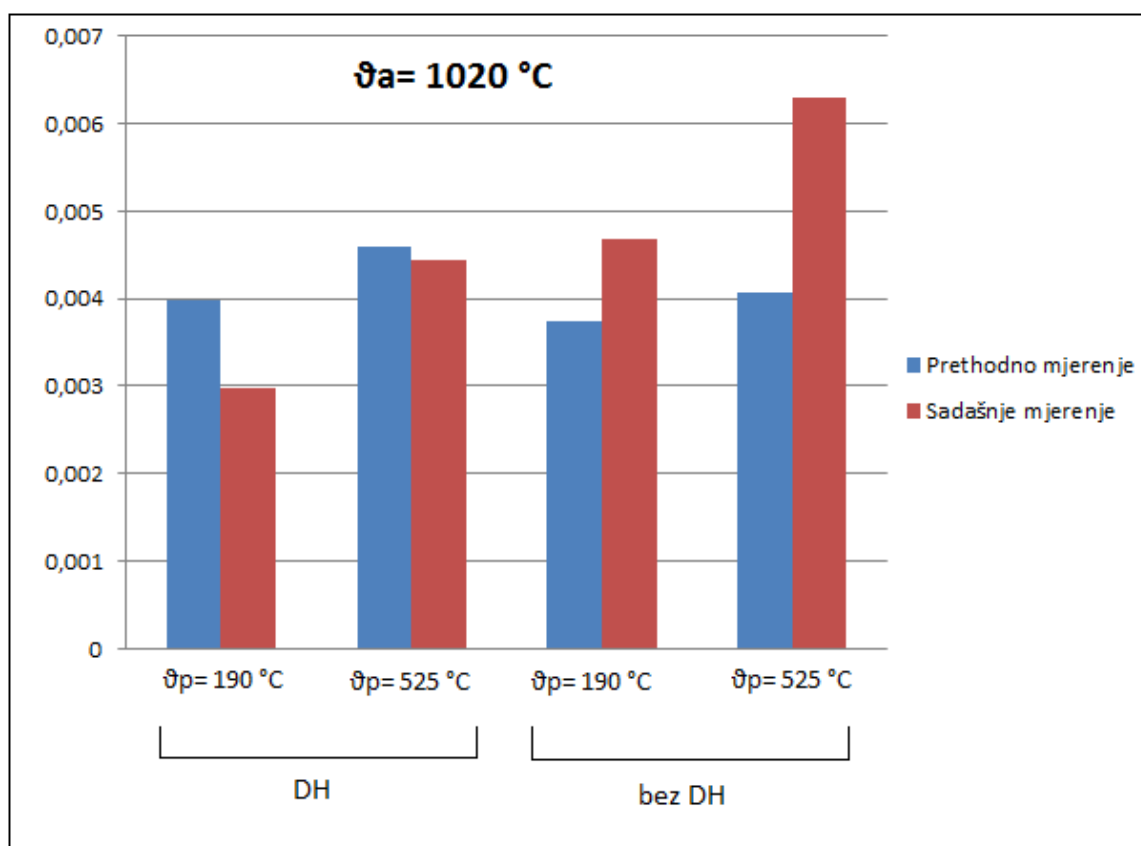
Duboko hladjeni uzorci općenito imaju nešto niže vrijednosti gubitka mase ali statistička analiza varijance ($F=0,711 < F_{crit.} = 6,94$) nije potvrdila njihov značaj.

Iz priloženih rezultata erozijskog ispitivanja i dijagrama tvrdoća skupina uzoraka vidljivo je na prvi pogled da rezultati erozijskog ispitivanja ne korespondiraju sa postignutim tvrdoćama uzoraka, iz čega proizlazi da svojstvo otpornosti na erozijsko trošenje ne ovisi isključivo o tvrdoći nego valja uzeti u obzir i druge parametre poput mikrostrukture alatnog čelika.

Zbog općenito velike disperzije rezultata po svakoj skupini materijala kao i relativno malenih apsolutnih vrijednosti razlika u rezultatima ne može se statistički utvrditi povezanost pojedinog ispitivanog stanja sa otpornosti na erozijsko trošenje visokolegiranog alatnog čelika za hladni rad.

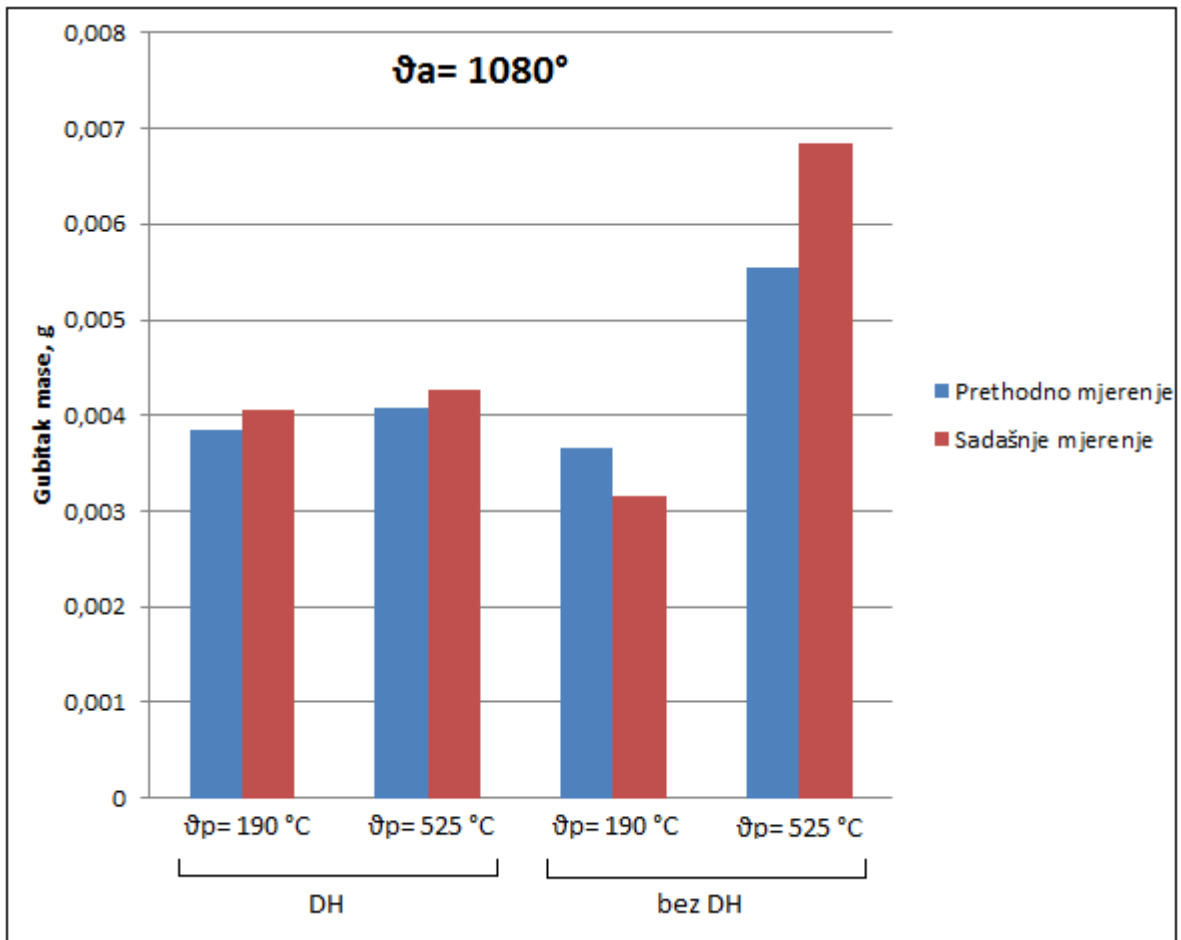
2.5.4 Usporedba sa rezultatima iz prethodnih radova

Isti ispitivani materijal koristio se i ranije u istraživanjima koja nisu uspjela potvrditi utjecaj parametara toplinske obrade na otpornost na trošenje. Pošto je ovaj rad ispitivao otpornost na abrazivnu eroziju (kut upada čestica 30°), uspoređeni su rezultati sa radom [12] koji je ispitivao trošenje uzoraka pod istim kutem u trajanju 15 minuta. Rezultati su podijeljeni po temperaturi austenitizacije te su dijagramski prikazani na slikama 20. i 21.



Slika 20. Usporedba rezultata prethodnih i vlastitih ispitivanja erozijskog trošenja u trajanju od 15 minuta za skupine uzoraka od čelika X155CrNiVMo 12-1 sa temperaturom austenitizacije $\vartheta_a = 1020 \text{ }^\circ\text{C}$

Uočljivo je da su rezultati za uzorke s nižom temperaturom austenitizacije poprilično slični, osim što se visokopopušteni uzorak ističe sa nešto većom vrijednosti gubitka mase. Analiza varijance je potvrdila da nema značajnih odstupanja u rezultatima mjerenja ($F=0,504 < F_{crit.}=5,98$) čime smo potvrdili ponovljivost rezultata u sličnim laboratorijskim uvjetima.



Slika 21. Usporedba rezultata prethodnih i vlastitih ispitivanja erozijskog trošenja u trajanju od 15 minuta za skupine uzoraka od čelika X155CrNiVMo 12-1 sa temperaturom austenitizacije $\vartheta_a = 1080\text{ °C}$

U slučaju uzoraka austenitiziranih na višoj temperaturi vidimo da su rezultati u prethodnom i sadašnjem mjerenju poprilično istovjetni bez velikih odstupanja u vrijednostima. Analiza varijance je potvrdila da nema značajnih odstupanja u vrijednostima ($F=0,751 < F_{crit.}=5,98$), čime smo potvrdili ponovljivost rezultata u istim laboratorijskim uvjetima.

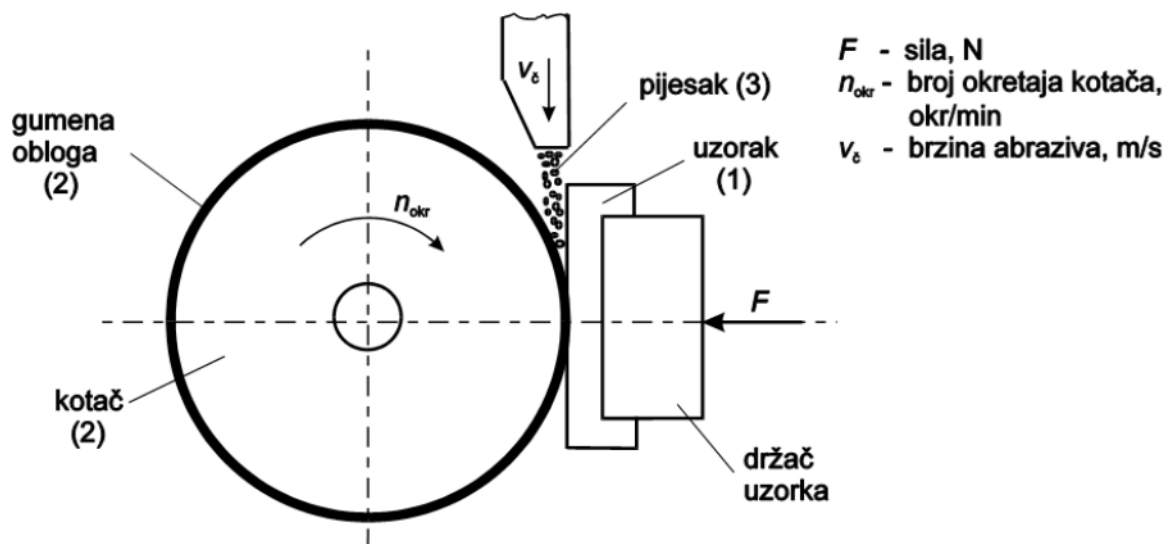
2.6 Ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje

Za ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje također imamo 8 skupina uzoraka koje su jednako toplinski obrađene kao i uzorci za erozijsko ispitivanje. Svaka skupina ima 2 uzorka što znači da ukupno imamo 16 uzoraka na raspolaganju.

Kumulativni broj okretaja koji svaki uzorak mora proći je 3000. Uzorci se čiste u ultrazvučnoj otopini prije svakog vaganja. Ukupno imamo 5 vaganja: na početku, te nakon kumulativnih 500, 1000, 2000 te 3000 okretaja uređaja.

2.6.1 Opis postupka

Ispitivanje otpornosti na abraziju provedeno je u laboratoriju za tribologiju na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, na uređaju koji je u skladu sa standardom ASTM G 65- „suhi pijesak-gumeni kotač“, slika 22. Samo ispitivanje nije u potpunosti u skladu sa navedenim standardom jer nije korišten abraziv (pijesak) Ottawa 50/70, nego se koristi isti pijesak, kao i kod erozijskog ispitivanja, oznake B 35 S.



Slika 22. Skica uređaja "suhi pijesak/gumeni kotač" [11]

Ispitna epruveta se učvrsti u čeljusti i naslanja na kotač obložen gumom a opterećena je utezima preko koljenaste poluge. Sila može iznositi 45 ili 130 N ovisno o varijanti postupka. Također se kao parametar uzima i broj okretaja kotača.

U našem slučaju korišteni abraziv bio je pijesak oznake B 35 S veličine zrna 0,063-0,355mm, a odabrana sila je 45 N.

Uzorci su vagani prije i nakon trošenja na preciznoj vagi Mettler B5C 1000.

2.6.2 Rezultati mjerenja otpornosti na abrazijsko trošenje

Rezultati mjerenja prikazani su u tablici 5., također su dijagramski prikazani kumulativni gubici masa prema temperaturi austenitizacije (slike 23. i 24.) , te na kraju su prikazani ukupni prosječni gubici mase prema skupinama uzoraka (slika 25.) i izmjerene tvrdoće uzoraka(slika 26.).

Tabela 5. Rezultati abrazijskog ispitivanja

ŝa	ŝp	DH	Oznaka uzorka	Kumulativni broj okretaja					
				m0	m500	m1000	m2000	m3000	dm
1080	525	NE	*2a	214,9572	214,8718	214,7833	214,6248	214,5048	0,4524
1080	525	NE	*2b	214,1073	214,0055	213,9238	213,8331	213,7154	0,3919
1020	525	NE	2a	214,0179	213,9476	213,8786	213,776	213,6721	0,3458
1020	525	NE	2b	214,2856	214,2363	214,1668	214,0402	213,9389	0,3467
1080	190	NE	*a	214,0251	213,948	213,8843	213,8274	213,7298	0,2953
1080	190	NE	*b	214,3269	214,2914	214,2376	214,1654	214,0771	0,2498
1020	525	DA	12a	214,3246	214,2182	214,1299	213,9685	213,8249	0,4997
1020	525	DA	12b	214,4702	214,3718	214,2901	214,1606	214,038	0,4322
1080	525	DA	*12a	214,0269	213,945	213,8664	213,7376	213,6351	0,3918
1080	525	DA	*12b	214,2818	214,2117	214,139	214,0083	213,9046	0,3772
1020	190	NE	/a	213,9196	213,8569	213,7946	213,683	213,5998	0,3198
1020	190	NE	/b	214,469	214,4085	214,345	214,2425	214,1532	0,3158
1080	190	DA	*1a	214,4399	214,344	214,2698	214,1434	214,0891	0,3508
1080	190	DA	*1b	214,7482	214,6761	214,617	214,4925	214,3891	0,3591
1020	190	DA	1a	214,1089	214,0184	213,9513	213,8311	213,733	0,3759
1020	190	DA	1b	214,5991	214,5498	214,4928	214,4087	214,3279	0,2712

m0- početna masa uzorka

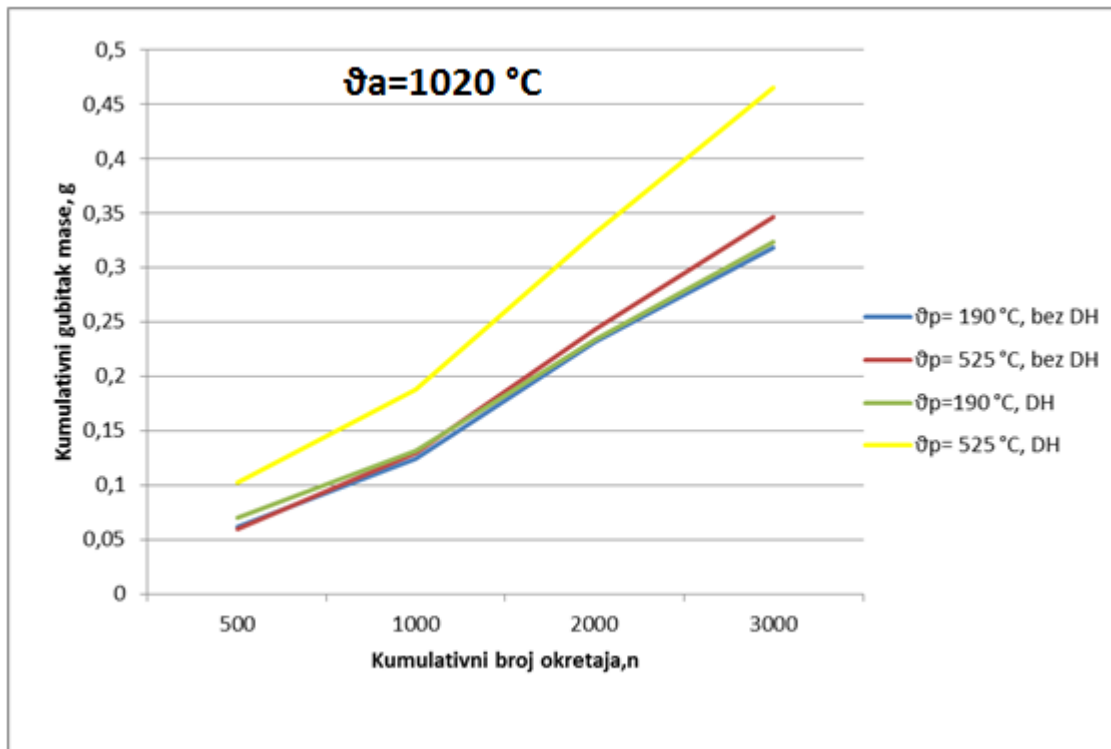
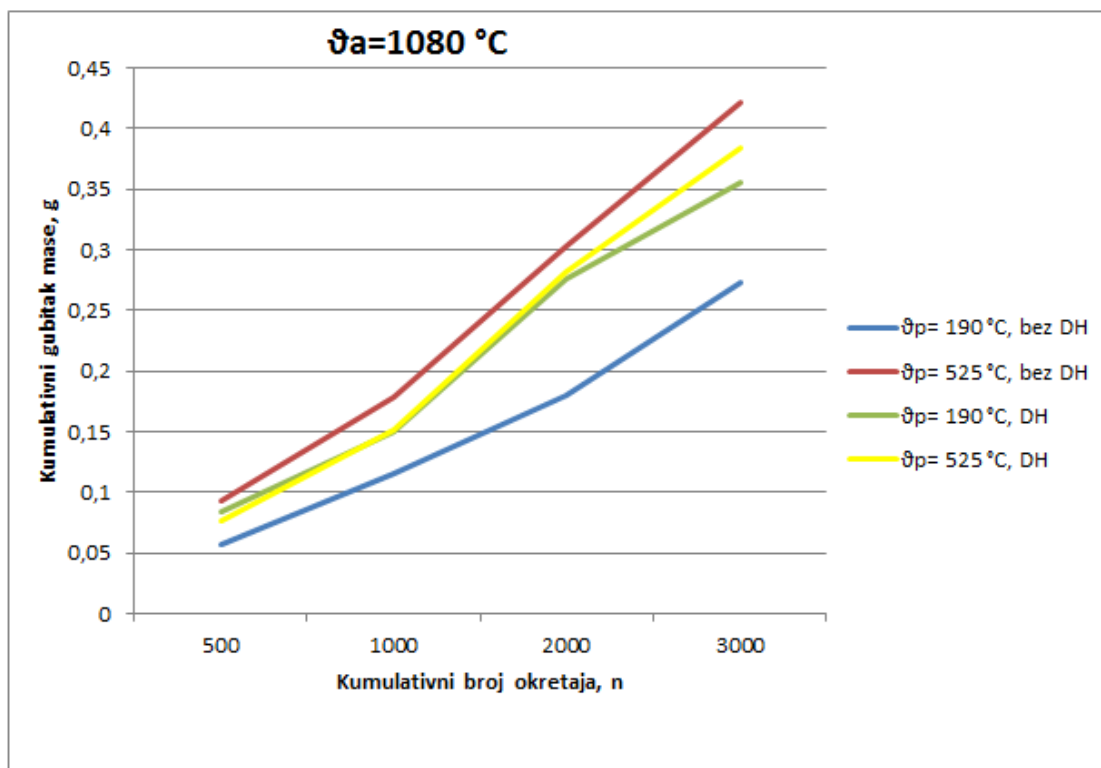
m500- masa uzorka nakon 500 okretaja

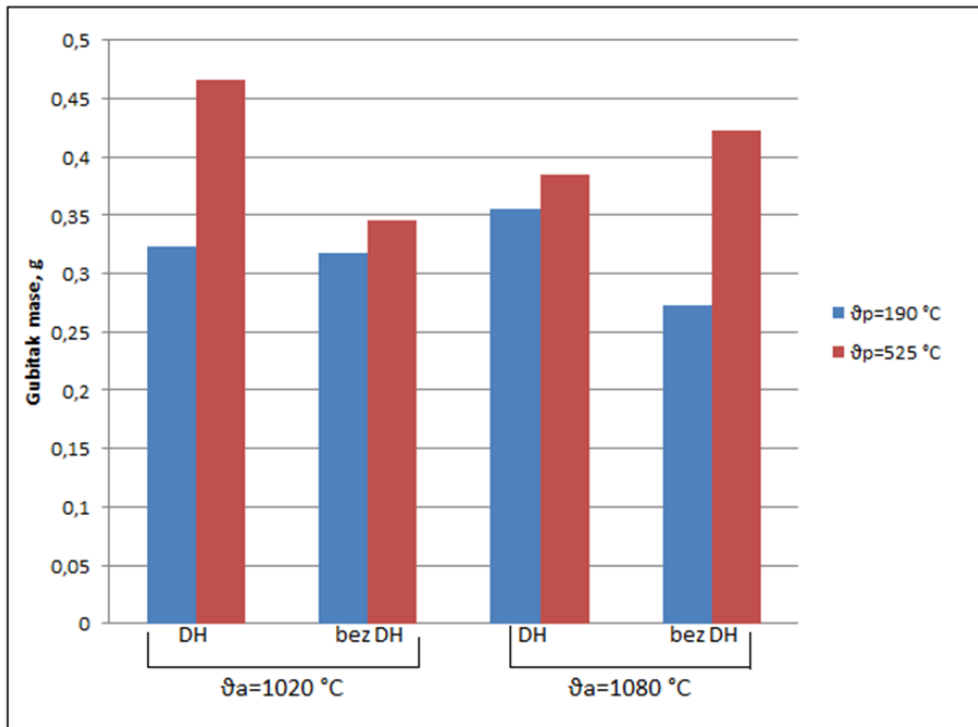
m1000- masa uzorka nakon 1000 okretaja

m2000- masa uzorka nakon 2000 okretaja

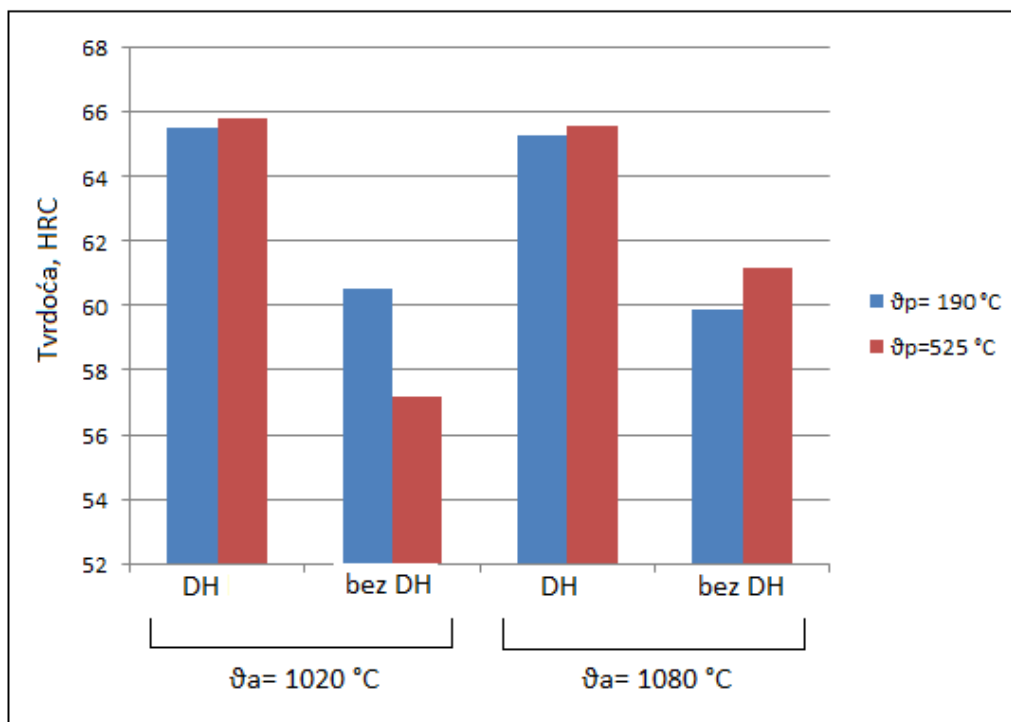
m3000- masa uzorka nakon 3000 okretaja

dm- ukupni gubitak mase uzorka°

Slika 23. Rezultati abrazijskog ispitivanja za skupine uzoraka sa $\vartheta_a = 1020^\circ\text{C}$ Slika 24. Rezultati abrazijskog ispitivanja za skupine uzoraka sa $\vartheta_a = 1080^\circ\text{C}$



Slika 25. Prosječni ukupni gubici masa (nakon 3000 okretaja) za svaku skupinu uzoraka nakon provedenog abrazijskog ispitivanja



Slika 26. Izmjerene tvrdoće uzoraka za abrazijsko ispitivanje[13]

2.6.3 Analiza rezultata

Uočeno je da porastom broja okretaja raste i gubitak mase uzoraka, sami rezultati ne korespondiraju sa izmjerenom tvrdoćom. Duboko hlađeni uzorci su imali nešto veće izmjerene tvrdoće od ostalih skupina uzoraka ali nisu pokazali značajno veću otpornost na trošenje od ostalih skupina uzoraka, čak su im i vrijednosti gubitka mase nešto veće od ostalih uzoraka.

Valja istaknuti da su najveću otpornost na abrazijsko trošenje prikazali uzorci austenitizirani na višoj temperaturi austenitizacije i potom niskopopušteni bez primijenjenog dubokog hlađenja na njima.

Visokopopušteni uzorci su općenito imali veći gubitak mase, ističu se uzorci koji su austenitizirani na nižoj temperaturi i potom duboko hlađeni.

Statistička analiza varijance je pokazala da nema značajne razlike u rezultatima abrazijskog trošenja ($F=0,0108 < F_{crit.}=5,98$), stoga se ne može ni potvrditi doprinos primijenjenih parametara toplinske obrade svojstvu otpornosti na abrazijsko trošenje visokolegiranih alatnih čelika za hladni rad.

3. ZAKLJUČAK

Nakon provedenih opsežnih triboloških ispitivanja na izabranom predstavniku visokolegiranih alatnih čelika za hladni rad X155CrVMo 12-1 može se zaključiti sljedeće:

- Duboko hlađenje povisuje tvrdoću alatnog čelika u vrijednosti u prosjeku od 3-5 HRC.
- Dugotrajnim ispitivanjem na erozijsko trošenje nije se mogla utvrditi povezanost između parametara toplinske obrade i otpornosti na erozijsko trošenje.
- Ispitivanjem otpornosti na abrazijsko trošenje utvrđen je prirast gubitka mase materijala u ovisnosti o broju okretaja ali se također nije mogla utvrditi statistička povezanost između pojedinog ciklusa toplinske obrade i postignute otpornosti na abrazijsko trošenje
- Usporedbom vlastitih rezultata sa rezultatima dosadašnjih provedenih opsežnih ispitivanja vidljivo je da su dobivene razmjerno dobre podudarnosti između rezultata za pojedina stanja ali nije, međutim, ustanovljena značajna povezanost između dubokog hlađenja sa postignutom otpornosti na trošenje izabranog predstavnika visokolegiranih alatnih čelika za hladni rad
- Stoga bi eventualna daljnja istraživanja valjalo provesti drugim metodama ispitivanja otpornosti na trošenje

4. LITERATURA

- [1] Filetin, T., Kovačićek, F., Indof, J.: Svojstva i primjena materijala, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2009.
- [2] Novosel, M., Cajner, F., Krumes, D: Alatni materijali, Strojarski fakultet, Slavonski brod, 1996.
- [3] Wang, C.C.: Wear resistance study on cryogenic treated AISI D2 tool steel, Department of Material Engineering, Tatung university, Tatung, 2006.
- [4] Krumes, D.: Toplinska obradba, Strojarski fakultet, Slavonski Brod, 2000. [5] Krumes, D.: Toplinska obradba, Strojarski fakultet, Slavonski Brod, 2000.
- [5] Effect of deep cryogenic treatment on the formation of nano sized carbides and the wear behavior of D2 tool steel, international Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials, September 2012, Volume 19, Issue 9, pp 795-799
- [6] Sun, C.H.: The effect of microstructure and the mechanical properties of AISI D2 tool steel by deep cryogenic treatment, Department of Material Engineering, Tatung University, Tatung, 2006
- [7] Šolić S. Utjecaj mikrostrukture brzoreznog čelika na tribološka svojstva reznih alata, doktorski rad, Zagreb 2010.
- [8] Wale, Wakchaure: Effect of Cryogenic Treatment on Mechanical Properties of Cold Work Tool Steels, Pune university, India, 2013.
- [9] Isaak, C.J.; Reitz, W.: The effects of cryogenic treatment on the thermal conductivity of GRCo-84, Materials and Manufacturing Processes 2008, 23(1), 82-91
- [10] Collins, D.N.; Dormer, J. Deep cryogenic treatment of a D2 coldworked tool steel, Heat Treat. Met. 1997
- [11] Ivušić, V.: Tribologija, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2002.

[12] Zoričić, M.: Otpornost čelika X155CrVMo12-1 na abrazivnu eroziju česticama, završni rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2013.

[13] Šimac N: Utjecaj dubokog hlađenja na mikrostrukturu i svojstva čelika X155CrVMo12-1, diplomski rad, Zagreb 2011.